

II

**LA ORGANIZACION, PARA INVES-
TIGACION CIENTIFICA,
DEL SERVICIO METEOROLOGICO
DEL REINO UNIDO**

Conferencia pronunciada en Madrid el día 4 de mayo de 1962

por

Sir GRAHAM SUTTON, C. B. E., FRS.

Director General del Meteorological Office, U. K.

LA ORGANIZACION, PARA INVESTIGACION CIENTIFICA, DEL SERVICIO METEOROLOGICO DEL REINO UNIDO

1. *Prólogo.*—“Meteorological Office” es el nombre del Servicio Meteorológico Estatal del Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte. Fué fundado en 1855, siendo el primer Director el Almirante Robert Fitz-Roy. El Office forma parte, hoy día, del Ministerio del Aire, siendo el Director General responsable ante el Ministro del Aire, a través de la Subsecretaría permanente del Ministerio del Aire. El Secretario del Estado del Aire es un Ministro de la Corona y cambia con bastante frecuencia, generalmente, cuando se forma un nuevo Gobierno, después de unas elecciones generales, pero pocas veces durante la vida de un Gobierno ordinario. El Subsecretario permanente, por otra parte, es un funcionario civil y normalmente conserva su cargo durante muchos años. No abandona su puesto por cambio del Gobierno y su situación, como la del Director General del Servicio Meteorológico, no está afectada por cambios políticos.

2. El Servicio Meteorológico es uno de los más importantes de entre los muchos organismos científicos estatales del Reino Unido. Su plantilla es de 3.500 personas y el presupuesto anual es alrededor de unos 5 millones y medio de libras (o sea, 900 millones de pesetas al cambio actual).

Este dinero forma parte del total asignado por el Parlamento al Ministerio del Aire.

Las funciones generales del Servicio Meteorológico son:

(I) la prestación de servicios meteorológicos a la Armada, Reales Fuerzas Aéreas, Aviación Civil, Marina, Departamentos civiles del Gobierno, corporaciones públicas, prensa y radiodifusión y al público en general;

(II) la organización de las observaciones meteorológicas en el Reino Unido y en ciertos sitios del extranjero;

(III) la recolección, distribución y publicación de información meteorológica de todas las partes del mundo;

(IV) el mantenimiento de ciertos Observatorios británicos y la publicación y distribución de su información magnética y sismológica;

(V) investigación en meteorología, geomagnetismo y sismología.

3. De las funciones arriba expuestas, las comprendidas en los capítulos (I) a (III) constituyen los que, en términos amplios, pueden ser llamados "servicios". Hoy intento concentrar mi atención en los dos últimos de la lista que pueden calificarse como "investigación". Esta división está reconocida en la estructura del Servicio Meteorológico, que tiene dos directores, de servicios y de investigación respectivamente, responsables ante el Director General.

Es, sin embargo, importante reconocer que no hay división rígida entre ambas funciones y, en la práctica, el personal operacional (servicios) y el de investigación, es libremente intercambiable y, en su mayoría, trabajan en el mismo edificio.

4. Antes de tratar de los objetivos y métodos de las investigaciones, debo hacer una breve referencia a la estructura de la organización del personal. El Servicio civil científico del Gobierno británico tiene tres clasificaciones principales:

- (a) Funcionarios científicos.
- (b) Funcionarios experimentales.
- (c) Ayudantes científicos.

La *clase del funcionario científico* está compuesta de graduados en Matemáticas y Ciencias. Se les considera como los cerebros "directivos y creadores" del Servicio y los puestos científicos más elevados se nutren, sin excepción, de sus filas. Los nombramientos se hacen normalmente como resultado de entrevistas realizadas por la Comisión del Servicio Civil (en presencia de representantes del Office), de aspirantes que han alcanzado las calificaciones académicas necesarias, pero a veces, el Office recluta a su personal directamente, al principio, de forma eventual. La mayoría de los puestos son permanentes y con derecho a pensión.

La *clase de funcionarios experimentales* está formada, en parte, por licenciados y, en parte, por aquéllos que ingresaron con el nivel normal de enseñanza superior y han recibido posteriormente instrucción en el Office. Los *Ayudantes* son no licenciados pero con enseñanza adecuada. La mayoría de estos puestos son, además, permanentes y tienen derecho a pensión. La investigación está dirigida principalmente por funcionarios científicos, con ayuda de los oficiales experimentales y de los ayudantes. En el Servicio Meteorológico existen hoy día unos 150 funcionarios de la clase de personal científico y alrededor de 750 funcionarios experimentales.

5. *Organización.*—La investigación absorbe una parte proporcionalmente grande del esfuerzo científico de Office. Como es obvio, no todas las ramas de la Meteorología están atendidas en la misma me-

dida. Debe hacerse alguna selección. Se demostró que es preferible dividir los estudios de investigación en dos amplios grupos, dinámico y físico, cada uno de los cuales está dirigido por un comisario-director, responsable ante el Director de Investigación. Por debajo de estos comisarios-directores hay varios departamentos que se ocupan de tareas especializadas. La organización se indica abajo (diapositiva).

DIRECTOR DE INVESTIGACION

COMISARIO-DIRECTOR (INVESTIGACION DINAMICA)

Investigación dinámica	Investigación sinóptica	Investigación climatológica	Investigaciones especiales
---------------------------	----------------------------	--------------------------------	-------------------------------

COMISARIO-DIRECTOR (INVESTIGACION FISICA)

Observatorios y Micrometeorol.	Física atmosférica	Estudio de la alta atmósfera	Desarrollo de instrumental
-----------------------------------	-----------------------	---------------------------------	-------------------------------

La mayoría de los nombres se explican por sí mismos, pero algunas notas adicionales pueden hacer la división más clara.

La "Investigación dinámica" cubre investigaciones matemáticas en sistemas atmosféricos en media y gran escala. Actualmente, el esfuerzo principal de esta rama está concentrado en el desarrollo de la predicción numérica, empleando un moderno calculador de alta velocidad. Más adelante, empezará el trabajo sobre la dinámica de la circulación general utilizando un calculador aún mayor.

El departamento de estudios sinópticos trata principalmente de los problemas del predictor, en particular, de la discriminación de los procesos dinámicos y termodinámicos, asociados a los sistemas elaboradores del tiempo en la atmósfera.

El departamento de investigaciones especiales se dedica a los problemas de Meteorología aplicada, tales como los que surgen en aviación, polución atmosférica y similares.

"Observaciones y Micrometeorología" trata principalmente de geomagnetismo y sismología y también de los grupos que estudian problemas de la atmósfera inferior relacionados con la Agricultura.

6 *Desarrollo de la investigación.*—Los temas elegidos para Investigación caen dentro de dos grupos: I) los seleccionados por el Office y II) los que han sido propuestos por organismos ajenos al Office. De estos dos grupos el primero es, con mucho, el más amplio. La Meteorología operacional crea muchos problemas y no hay nunca falta de material para los equipos de investigación. La dificultad está

en hacer una selección. Durante muchos años, hemos dividido nuestros problemas según su prioridad. Los problemas más urgentes son clasificados como PX; éstos deben ser dotados de equipo completo en todo tiempo. Los menos urgentes, pero, sin embargo, importantes, se designan como PI; éstos están dotados de equipo tanto como es posible, pero pueden descartarse por algún tiempo, si un problema PX particularmente urgente exige atención. Los de la clase de reserva se llaman P2; estos son problemas reconocidos como dignos de estudio, pero que están en expectativa mientras no haya posibilidades o de personal o de equipo.

Actualmente 29 problemas están clasificados como PX, 115 como PI y 38 como problemas P2. La responsabilidad principal de la selección y clasificación de los problemas, corresponde al Director de Investigaciones, pero el Office es asistido por el Comité de Investigación Meteorológica. Este organismo está compuesto por científicos ajenos al Office y por antiguos directores. Tiene dos subcomités, uno de los cuales se ocupa principalmente de los instrumentos, observaciones e investigación física, y el otro, de los problemas dinámicos y sinópticos.

La M. R. C. es un eficaz organismo que dedica la mayor parte de su tiempo a discutir y valorar los documentos de investigación que proceden de la Superioridad. Informa a la Secretaría del Estado del Aire, pero sólo de un modo consultivo; no tiene poderes ejecutivos y la responsabilidad final del programa de investigación recae en el Director General.

En la práctica, este esquema que fué creado por el difunto Sir Nelson Johnson en 1943, ha funcionado muy bien. Proporciona al Servicio no sólo el beneficio de un valioso consejo en su trabajo ordinario, sino que también le facilita contacto con las universidades y otros organismos científicos. En la M. R. C., se ha mantenido, desde su creación, una tradición de discusión libre y franca y el Comité de Investigación es ahora considerado como una parte indispensable de la estructura del Servicio.

Además de la estructura regular, anteriormente esbozada, el Servicio Meteorológico tiene otros recursos en materia de investigación. En el Servicio Civil Británico es posible conseguir investigadores para casos extraordinarios contratados eventualmente.

Tales especialistas tienen libertad para dedicarse a los trabajos que se les ha encomendado, facilitando el Office el personal y ayuda necesarios. Actualmente hay tres puestos semejantes en el Servicio Meteorológico: uno referente a micrometeorología, otro a investigaciones estadísticas y otro a la aplicación de la Meteorología a problemas de la Agricultura.

Una segunda corriente de investigación es suministrada por sub-

venciones extraordinarias. A los que trabajan en universidades y desean realizar investigaciones para el Servicio, se les pueden conceder subvenciones o becas para períodos que varían desde uno hasta tres años. Normalmente tales subvenciones permiten a los catedráticos y profesores universitarios, becar a estudiantes para doctorarse en alguna rama de la Ciencia atmosférica. Finalmente, el Servicio, a través del Ministerio del Aire, sostiene económicamente a uno de los Comités de la Real Sociedad que se ocupan de asuntos que por ahora no son de gran interés directo para los Meteorólogos, pero que pueden llegar a serlo en el futuro, tales como los procesos fotoquímicos en el límite de la atmósfera.

La investigación del geomagnetismo y sismología ha figurado desde hace mucho, entre las funciones del Servicio Meteorológico, a pesar de que muchas veces tienen poca o indirecta relación con la atmósfera. Han trabajado en esta materia dos investigadores contratados que informan al Director de Investigación. No están sujetos a programas específicos, sino que se les deja seleccionar libremente sus propios temas facilitándoles lo que necesitan por cuenta de los recursos oficiales.

7. *Ayudas.*—Los principales laboratorios de investigación del Servicio Meteorológico, están en Bracknell, a unos 50 kilómetros al oeste de Londres. Un ala del edificio principal está dedicado especialmente a investigación instrumental y física. Además de un taller principal de ingeniería mecánica hay dos túneles de aire, cámaras frigoríficas y oficinas de diseño. Los laboratorios individuales, generalmente a cargo de determinados oficiales científicos, están bien dotados de energía eléctrica en varios voltajes y frecuencias, agua, gas y aire comprimido. En otra parte del edificio está instalado el computador digital de alta velocidad (un Ferranti Mercury), y la Biblioteca Meteorológica Nacional está en otro bloque. A unos 5 kilómetros del edificio principal está el Centro Experimental, en un área a campo abierto, con laboratorios y oficinas adyacentes.

Tal es el sistema por el que el Office lleva a cabo sus investigaciones. A simple vista la estructura parece compleja y diversa; en la práctica trabaja fácil y, creo que, eficientemente. A un científico joven, que ingresa en el Servicio, se le da un entrenamiento de seis meses en nuestra escuela sobre los aspectos más profesionales del trabajo, seguido de otros seis meses de breves períodos en puestos de investigación y estaciones experimentales. Después de esto, si lo desea, se le permite ingresar en el departamento de investigación donde debe permanecer durante los cuatro o cinco años siguientes. Los meteorólogos, sin embargo, deben permanecer algún tiempo en el "banco de pruebas" con el fin de prepararse para puestos de mayor responsabilidad en la predicción, y esto se consigue por medio de un destino en una unidad operacional espe-

cializada después del período de investigación. Más adelante el oficial puede volver a la investigación o también pasar a otros servicios de acuerdo con su preparación y preferencias. De esta forma es de esperar que se reduzcan al mínimo los peligros de que el investigador pierda el contacto con la realidad o de que el meteorólogo efectivo permanezca ignorante de los últimos avances.

En el planteamiento de la organización se ha tenido muy en cuenta un principio: el de evitar la creación de dos partes separadas del Office, que rara vez llegan tener contacto entre sí. Es tan necesario para el investigador apreciar las dificultades del meteorólogo en funciones, como lo es para los predictores o climatólogos impedir el adocenamiento. Otra medida de seguridad ha sido tomada para crear un departamento de enlace, llamado de "técnicas y entrenamiento" que, además de supervisar el trabajo de la Escuela de Información, se preocupa por llevar los adelantos técnicos a aquellos que trabajan en las estaciones de fuera (generalmente, campos de aviación) y también para alentar a los meteorólogos que trabajan fuera del Centro a que emprendan, por su propia iniciativa, algún trabajo de investigación.

8. *Temas de investigación.*—Los problemas de investigación del Servicio Meteorológico están clasificados en tres apartados principales:

- (I) Instrumentos.
- (II) Meteorología sinóptica y dinámica, incluida Climatología.
- (III) Meteorología Física.

Lo que sigue son ejemplos de diferentes apartados:

- (I) Desarrollo del nuevo radiosonda M. O.

Diseño y desarrollo de un tipo de higrómetro automático de punto de congelación para su empleo en aviación.

Diseño de instrumentos sensibles para cohetes y satélites.

- (II) Cálculo y predicción de vientos hasta alrededor de 35 kilómetros de altura.

Predicción de nieblas de radiación.

Resolución numérica (empleando calculadores de alta velocidad), de las ecuaciones dinámicas de determinadas situaciones sinópticas.

Variaciones en los modelos a gran escala de la circulación en la troposfera con períodos hasta de un mes.

El intercambio de energía entre la atmósfera y los océanos.

- (III) Estructura física de las nubes que producen lluvia.

Estudio experimental de la difusión de la materia en la atmósfera.

Exploración de la alta atmósfera por medio de cohetes.

Observación y estudio de ozono en la atmósfera por medio de satélites.

Estos son unos pocos ejemplos del total de problemas del tipo 29 PX. En éstos el trabajo se está realizando a la mayor velocidad posible, pero también se presta atención a otros (PI), problemas.

Me propongo dedicar el resto de esta disertación a considerar tres puntos de investigación para demostrar cómo trabaja en la práctica el sistema que he descrito antes. Las materias seleccionadas son:

- (I) Investigación de la alta atmósfera.
- (II) Predicción numérica.
- (III) Desarrollo de registradores automáticos de base de nubes.

9. Investigación de la alta atmósfera.

La investigación de la alta atmósfera puede ser ampliamente dividida en:

A. Una prolongación hacia arriba de las medidas hechas por radiosondas (vientos y temperatura).

B. Medidas de las concentraciones de materias como ozono y polvo, que son importantes, no sólo respecto a estudios de balance de radiación, sino también como trazadores atmosféricos.

A. *Prolongación ascendente de las medidas de radiosondas.*

Para esto proponemos el empleo de cohetes relativamente pequeños que lleven una sonda, no distinta a nuestro primitivo globo radiosonda, sujeto a un paracaídas grande. La sonda y el paracaídas son expulsados del cohete a una altura de 60 kilómetros. El paracaídas se abre y desciende, inicialmente a unos 100 m/s., y es arrastrado por el viento. Puede ser seguido por medio de radar, y así, se determinan los vientos. Al mismo tiempo la sonda está transmitiendo medidas de temperatura.

B. *Medida de ozono y polvo.*

Cualquier materia, cuya concentración varía de lugar en lugar y de nivel a nivel, puede emplearse como un "elemento trazador", para determinar el movimiento del aire, tanto horizontal como verticalmente. La radiactividad producida artificialmente, se emplea a menudo de este modo. Hay, no obstante, variadas materias que se producen por vía natural y que pueden usarse. Tales son: el polvo y el ozono.

(a) *Polvo*.—El polvo está atravesando continuamente la atmósfera terrestre como restos de meteoritos. Una medida de la cantidad de polvo, puede conseguirse midiendo la cantidad de luz dispersada de un proyector, colocando un receptor a unos 40 kilómetros de distancia. Son indispensables, noches despejadas, claras, sin luna, y éstas ocurren, en las Islas Británicas, sólo unas 10 veces al año. Así que, aunque se han hecho

medidas en los dos últimos años, no podemos aún sacar conclusiones, excepto que, efectivamente, se producen grandes variaciones de polvo.

(b) *Ozono*.—Medidas de la distribución vertical del ozono, pueden hacerse por medio de globos hasta unos 35 kilómetros, y el Servicio Meteorológico está planeando el establecimiento de una red de estaciones para determinación de ozono. Se pueden hacer medidas a alturas de más de 35 kilómetros desde un satélite. Un experimento del Servicio Meteorológico, planeado para realizar esto, se ha incluido en el segundo satélite de la serie "Scout" UK/USA, previsto para ser lanzado el próximo año. En este experimento se miden cambios en la atenuación de la radiación solar u/v dos veces sobre cada órbita: cuando el satélite entra y, otra vez, cuando sale de la sombra de la Tierra.

Puesto que la atenuación es ampliamente debida al ozono, puede determinarse la cantidad de ozono y la distribución vertical.

El material debe ser, por supuesto, extremadamente robusto y de confianza y debe estar perfectamente calibrado para todas las posiciones posibles del sol relativo en el eje de giro del satélite.

10. *Predicción numérica del tiempo.*

El estudio de la dinámica de los movimientos de aire en gran escala, recibió un importante impulso después de la segunda guerra mundial a partir de dos factores: a) la utilización regular de una red de sondeos de aire superior suficiente para definir el movimiento del aire en gran escala y b) los estudios teóricos de Rossby ¹ y Sutcliffe ² que habían demostrado, cómo las ecuaciones del movimiento atmosférico proporcionan expresiones del cambio de vorticidad en gran escala (sobre un eje vertical), que puede aplicarse a los modelos sinópticos individuales del movimiento del aire.

Sutcliffe y Forsdyke ³ proporcionaron reglas cualitativas por las que las ecuaciones dinámicas podían aplicarse como un instrumento de predicción a determinados mapas de aire superior de los contornos de superficies isobáricas y del espesor de capas específicas entre ellas. Sin embargo, era natural hacer lo posible por calcular los términos individuales de las ecuaciones dinámicas a partir de mapas sinópticos por medio de métodos gráficos y diferenciales finitos, proporcionando la *razón geostrófica*, el eslabón entre el geopotencial y el viento.

Los cálculos aislados no fueron difíciles, pero cuando tenían que repetirse varios cientos de veces en diferentes puntos para construir un mapa, el trabajo con lápiz, papel y calculadoras pronto llegó a ser demasiado laborioso. En esta etapa (en 1951), se pudo alquilar en Londres un calculador electrónico comercial con el que se hicieron algunos de los cálculos. Los cálculos se extendieron pronto a la determinación del *grado de intercambio* a la altura de la superficie de 500 mb.,

siguiendo los métodos ideados por Charney⁴ en los Estados Unidos; no obstante, los cálculos se extendieron a cambios en el espesor de 1.000-500 mbs. Se hizo evidente que era prácticamente posible el cálculo, paso a paso, de los cambios en las veinticuatro horas por determinación del grado de intercambio cada hora, y en 1954 se habían ultimado diez cálculos experimentales de cambios en veinticuatro horas a 500 mbs. y en un espesor de 1.000-500 mbs.

Resultó indudable, a la vista de los resultados, que siguiendo estas líneas podía llegarse a un método práctico de predicción del campo de 500 mbs. y 1.000-500 mbs. de espesor, pero todavía quedaban por hacer otras muchas determinaciones experimentales. Se consideró que sería necesario realizar series de unos 100 cálculos sobre la base de una variedad de fórmulas matemáticas y físicas, para elegir el método más adecuado para la aplicación práctica. Esto fué irrealizable por la imposibilidad de compartir el trabajo de una calculadora que en principio fué prevista para otro trabajo y se decidió adquirir una calculadora para este fin. La máquina estuvo disponible en enero de 1959. Mientras tanto se continuaron otros experimentos con una calculadora electrónica en Manchester, durante los cuales se consiguió mejorar los resultados por la introducción en los cálculos del efecto de algunos factores, tales como el calentamiento, por el océano, de las masas de aire frío y por la admisión de ciertas *divergencias del movimiento rigurosamente geostrófico*. El esfuerzo había sido también extendido al problema de analizar las observaciones de radiosonda y del uso de la calculadora para preparar los datos iniciales para hacer una predicción directa a partir del radiosonda y otras observaciones, como las recibidas por los teletipos en cinta perforada.

Con la instalación en el Office de la calculadora electrónica se iniciaron, con base actual, unas series de predicciones numéricas de la superficie de 500 mbs. y espesor de 500 a 1.000 mbs. Se partió de los datos de 00,00 T. M. G. y se extendió hasta las 00,00 y 06,00 T. M. G. del día siguiente. Salían a última hora de la mañana.

Dos series de 92 de tales predicciones, usando técnicas ligeramente diferentes basadas en una representación de la atmósfera con 2 parámetros, fueron completadas durante 1959. Se alcanzó un nivel de aciertos casi igual al conseguido por los métodos de predicción subjetiva de mapas de aire superior y ligeramente inferior respecto a los de superficie. (Ver Knighting y otros⁵). Fué, sin embargo, evidente, que el pronosticador convencional tenía la ventaja del acceso a los últimos mapas que, aunque incompletos, proporcionaban datos más recientes que los utilizables por la calculadora. Ensayos más recientes han intentado eliminar esta diferencia empleando como datos básicos las observaciones de superficie de 06,00 T. M. G., así como las de

aire superior de medianoche para la predicción numérica que quedaba ultimada a las 09,30 T. M. G. Este programa más ajustado trajo consigo, sin embargo, ligeras dificultades prácticas provenientes de faltas ocasionales del calculador, errores en su manejo y, lo que es más importante, de graves errores, no descubiertos, en los datos iniciales. Como consecuencia, la predicción sólo fué acertada en un 50 por 100 de los casos.

Una comparación subjetiva de los mapas isobáricos de predicción al nivel del mar preparados por métodos subjetivos y numéricos demostró que las predicciones numéricas fueron iguales o mejores que los mapas subjetivos en 37 de 85 ocasiones, ligeramente peores en 26 y notablemente inferiores en 22 ocasiones. En 9 de las ocasiones clasificadas como "ligeramente peores", ambas predicciones fueron consideradas como "buenas". Se llegó a la conclusión de que sólo se precisaba una pequeña mejora en la exactitud general de las predicciones numéricas para proporcionar un útil suplemento a los métodos subjetivos, ambos en cuanto a la predicción de mapas isobáricos al nivel del mar y mapas de aire superior. El pequeño equipo de 6 científicos comprometido en los ensayos de predicción numérica prosigue sus experiencias para mejorar el nivel de las predicciones. Estas comprenden la inclusión de más niveles en los datos iniciales, perfeccionamiento en la aproximación geostrófica, mejoras en la técnica matemática y la inclusión de efectos, tales como la elección de la superficie de fricción, topografía y procesos no adiabáticos. En la esperanza de que este trabajo conduzca a una técnica que mejore los métodos corrientes de preparación de mapas previstos, se están tomando medidas para reemplazar en pocos años el calculador existente por una máquina más rápida y menos sujeta a averías ocasionales. Se confía también en que el equipo de investigación será capaz de dedicar algún esfuerzo para aplicar similares técnicas numéricas, tanto a fenómenos en escalas algo más pequeñas como algo mayores, especialmente a frentes y líneas de turbonada por una parte y a la circulación general por otra. En ambos terrenos la aplicación del pronóstico del tiempo no será inmediata, pero la posibilidad de un creciente conocimiento de los fenómenos justificaría el esfuerzo y las aplicaciones definitivas no podrán ser precisadas hasta que se haya conseguido el conocimiento completo.

El registrador de la base de nubes M. O.

El desarrollo de instrumentos meteorológicos nuevos o mejorados proyectado para su empleo en amplio campo presenta ciertas dificultades que rara vez alcanzan el mismo grado respecto a otros instrumentos científicos.

Estas dificultades suceden en parte por la escasez frecuente, en Me-

teorología, de definiciones completas en términos adecuados para la aplicación instrumental y, en parte, por las condiciones adversas bajo las cuales serán empleados los instrumentos.

La escasez de definiciones precisas y adecuadas respecto a las medidas meteorológicas más frecuentes no es en modo alguno achacable a descuido por parte de los meteorólogos. La Organización Meteorológica Mundial ha tenido este problema bajo continuo y constante estudio durante muchos años, pero queda mucho que hacer todavía.

En ciertos casos las dificultades surgen a causa de los variados usos a los que una simple observación puede más tarde ser aplicada, usos que no son conocidos ni en el momento de diseñar el equipo de medida ni siquiera en el de hacer la observación. Las mediciones forman parte de la reserva general de conocimientos meteorológicos y encuentran más adelante una gran variedad de aplicaciones.

Mientras está haciéndose cualquier medida individual de condiciones atmosféricas, el mismo parámetro estará, frecuentemente, en un estado de cambio rápido. La inercia instrumental o constante de tiempo es por esto de importancia obvia, pero de nuevo falta frecuentemente una firme definición en cuanto a lo que ésta debiera ser. Al mismo tiempo se producirán cambios a otras condiciones ambientales, con lo que queda bien demostrado lo difícil que resulta aislar el efecto de estos cambios de la medida del parámetro deseado.

Para ilustrar el desarrollo del instrumento es de interés seguir las etapas del diseño, por el Servicio Meteorológico, de un aparato para observar continuamente la altura de la base de la nube más baja, el "registrador de base de nubes". Al describir este desarrollo no se pretende que la solución británica de este problema sea la única, ya que de hecho trabajos muy similares se han llevado a cabo en varios países simultáneamente. Se cree, sin embargo, que el Reino Unido fué uno de los primeros en empezar en este terreno y, aunque no el primero en producir un modelo utilizable comercialmente, realizó, quizá, las más exhaustivas investigaciones experimentales en lo que respecta a la importancia de las mediciones:

Durante muchos años la altura de la base de las nubes ha sido determinada soltando pequeños globos dotados de velocidad ascensional aproximadamente conocida o, por la noche, usando un proyector y observando visualmente. Ambos métodos tienen serios inconvenientes, aunque el último es notablemente mejor tanto por precisión como por comodidad. Un método de proyector que puede ser usado tanto de día como de noche, y "observado" constante y automáticamente, fué preparado con el fin de ofrecer considerables ventajas, especialmente en los grandes aeropuertos.

El método atrajo alguna atención ya en 1936, pero los equipos y téc-

nicas adecuados no estaban entonces preparados y, después de algunas investigaciones particulares, la idea pasó. No fué hasta 1943, en que un firme requerimiento oficial fué dispuesto y el trabajo fué ejecutado en otro laboratorio del Gobierno. La prioridad dada a la tarea fué poca y, sólo en 1951, se empezó realmente un activo desarrollo dentro del Servicio Meteorológico.

Fueron tenidos en consideración tres sistemas posibles de medida. Uno enfocó el empleo del radar de muy alta frecuencia, el segundo un método análogo al radar, pero usando luz pulsada, mientras el tercero fué basado en la triangulación de un rayo de proyector, visto desde distancia.

Teniendo en cuenta que para fines corrientes meteorológicos y de aviación, la base de las nubes es definida por un concepto de observación visual, se consideró que el radar, usando longitudes de onda muy largas comparadas con las de la luz, pudiese dar resultados discrepantes de los observados visualmente. El método de luz pulsada fué primeramente elegido, pero aunque se vencieron las mayores dificultades y se sometió a prueba un instrumento adecuado, el método fué abandonado en 1958 a causa del coste y complejidad.

Por aquella fecha se había avanzado ya mucho en un método de triangulación, básicamente similar en principio al aceptado proyector nocturno visualmente observado, y en 1958 se decidió proseguir con este sistema exclusivamente.

El fundamento del método es bastante simple. A un rayo de luz de un proyector se le hace describir, continuamente desde arriba hacia abajo, un arco en un plano vertical que produce una señal luminosa móvil en la base de la nube. El receptor, que consiste en una célula fotoeléctrica colocada en el foco de un visor similar al proyector, se coloca a una distancia conocida de éste en el plano del arco. Puesto que el rayo de luz incide desde la nube inmediatamente sobre el receptor, la altura de la nube puede determinarse por el ángulo formado por el rayo luminoso y la distancia de la línea base entre proyector y receptor. Esta información se transmite automáticamente al receptor.

Para hacer posible que el sistema opere tanto de día como de noche, es necesario que la luz del proyector pueda distinguirse del fondo más constante de la luz del día. Con ese fin se modula el rayo del proyector o se interrumpe en un intervalo controlado, por medio de un obturador giratorio. Gran parte del esfuerzo de investigación fué dedicado a la selección de un intervalo de modulación adecuado, a la elección de motores de velocidad constante y de un diseño de obturador que suministrara una modulación realmente constante. Un intervalo de modulación de 900 ciclos por segundo fué finalmente elegido.

El trabajo ulterior fué dirigido hacia la unidad fotocélula y al ampli-

ficador de gran aumento, necesario para amplificar la pequeñísima cantidad de luz dispersa recibida a un nivel en el que pueda ser empleada útilmente.

Esto resultó de tanto éxito que, aunque el sistema se había pedido para trabajar con alturas de nubes de hasta 1.200 metros, el diseño final fué capaz de detectar el rayo del proyector a alturas considerablemente mayores, probablemente de hasta 2.500 metros.

El movimiento angular del proyector se transmite continuamente al soporte de la plumilla del receptor por medio de un platillo magnético, interponiendo una leva para transformar el ángulo actual en la altura verdadera. El soporte de la plumilla está, por eso, en movimiento continuo y en contacto constante con el papel de registro, pero no se registra ningún trazo, excepto cuando la luz modulada procedente del proyector es detectada por el receptor, indicando que el rayo está cayendo desde la nube justamente sobre el receptor. La señal desde el receptor cierra entonces un relé y se permite a la corriente atravesar el soporte de la plumilla y quema un trazo sobre el papel electrolítico especial empleado para registro. Como se requiere un movimiento angular limitado para que el rayo del proyector se mueva por el área de cielo observado por la fotocélula receptora, el registrador dibuja una línea sobre la banda, demostrando que, a pesar del amplio intervalo cubierto por la línea, se recibe una luz de suficiente potencia para hacer funcionar el sistema. La base de cada línea se considera como la altura de la base de la nube. Cada línea corresponde a un "barrido" del proyector, siendo aquellos alternativamente hacia arriba y hacia abajo con una observación cada medio minuto.

De acuerdo con estos datos fué construído un prototipo en el laboratorio y se ensayó en el aeropuerto de Londres durante cerca de tres años. El modelo no resultó particularmente de confianza respecto a la construcción mecánica, pero en esta etapa esto no era esencial—la finalidad era investigar el significado exacto de las observaciones.

Se encontró que, comparado con un observador experto, que hacía lecturas independientes con un proyector visual nocturno, hubo ocasiones en que no se obtuvo registro instrumental de capas delgadas consideradas por el observador como nubes. Como, sin embargo, hubo una cantidad casi igual de casos en los que se obtuvo un registro de capas que el observador había rechazado como neblina o calima, se consideró que esta diferencia era debida a la naturaleza subjetiva de la observación visual y que el registrador era, por lo menos, consecuente.

Más notablemente, los resultados demostraron que, por término medio, el observador dió un valor de la base de las nubes alrededor del 10 por 100 más alto que el aparato, a pesar de las cuidadosas confrontaciones de la geometría del sistema. Si el amplio disco de luz producido

por el proyector, incidía realmente sobre la base de una nube claramente bien definida, de la misma forma que una luz es reflejada por una pared sólida, fué difícil ver qué cantidad de luz, suficiente para operar el receptor, se podía obtener de esa amplia mancha. La duda procedía de si la amplia mancha se producía realmente dentro de la misma nube. Para comprobar esto se modificó temporalmente el registro de la base de la nube, para dar un registro de la efectiva intensidad de luz recibida de la nube.

Se encontró que, mientras el rayo no producía virtualmente luz dispersa debajo de la nube, la dispersión en pequeñas cantidades empezaba tan pronto era alcanzada la base y continuaba aumentando hasta su máximo valor, la "mancha brillante", que podría estar de 50 a 100 metros sobre el nivel. La luz difundida decrecía en seguida en intensidad a medida que era atenuada por la misma nube. El actual nivel de sensibilidad del registrador de base de nube obligaba al equipo de registro a operar un poco por debajo del máximo valor luminoso, *teniendo en cuenta así las diferencias observadas*. Como la diferencia estaba a favor del registrador de base de nubes, en consideración a la seguridad de los aviones, sus registros fueron aceptados como más aproximados a los verdaderos valores de la base de las nubes.

De acuerdo con estos ensayos del *fundamento de la operación*, el instrumento fué totalmente rediseñado y reconstruido por el equipo de desarrollo del Servicio Meteorológico. Aunque se conservaron las características fundamentales del sistema, se prestó mucha atención a un adecuado diseño mecánico y electrónico y a los modernos sistemas instrumentales como construcción, resistencia a las inclemencias del tiempo y accesibilidad.

El receptor original fué construido en el laboratorio con los materiales y componentes adecuados que se tenían a mano.

La nueva versión proporcionó accesibilidad para mantenimiento, resistencia a inclemencias del tiempo y mejoras en el diseño general.

La versión del laboratorio del registrador era completamente primitiva y sin atractivo. La nueva versión diseñada sigue las normas modernas en cuanto a diseño y aspecto.

El modelo original de construcción del mecanismo del proyector, mostrado aquí sin su cubierta fué, mecánicamente, bastante pobre. El largo eje que accionaba la pantalla era una fuente de debilidad, a la vez que el mecanismo del proyector de exploración era completamente exterior. La versión final fué hecha mucho más compacta.

Todo el mecanismo puede fácilmente ser encerrado en una sola cubierta, y la pantalla, de rápido giro ahora, toma la forma de un disco de plástico con pequeñas fuerzas centrífugas.

Prosiguiendo la construcción del modelo mejorado, se realizó otro

breve ensayo, esta vez casi exclusivamente para asegurar que se había conseguido el grado requerido de confianza y utilidad operacional, se confirmó esto y se firmó un contrato con un fabricante particular, para producir un cierto número de equipos del mismo diseño, usando el modelo del Servicio Meteorológico como patrón. Durante toda la etapa de fabricación, el equipo de desarrollo permaneció en estrecho contacto con la construcción, aconsejando cuando era preciso y teniendo en cuenta las propuestas hechas por los fabricantes sobre pequeños cambios respecto a detalles. Cuando se fabricaron los equipos el personal del Servicio Meteorológico realizó las pruebas de admisión necesarias y emprendió los aspectos más técnicos de la instalación. Las versiones finales fabricadas seguían muy fielmente el diseño de nuestro propio modelo, aunque les fueron incorporados cierto número de pequeñas mejoras y algunos cambios para conseguir una mejor fabricación en serie.

El instrumento está ahora en uso corriente en cierto número de estaciones y va a hacerse un pedido aún mayor de aparatos. A la luz de la experiencia obtenida en la práctica, el equipo de desarrollo incorporará algunas modificaciones en cuanto a la escala, y están ahora trabajando sobre los requisitos, tanto de un modelo para uso en los trópicos como para telemetrar las observaciones, con el fin de que las medidas puedan hacerse remotamente en campos de aterrizaje a lo largo de la línea de aproximación del avión.

B I B L I O G R A F I A

1. ROSSBY, C. G., 1940. Planetary flow patterns in the atmosphere. Quart. Jour. Roy. Met. Soc. (Suppt), pág. 68.
2. SUTCLIFFE, R. C., 1947. A contribution to the theory of development. Quart. J. Roy. Met. Soc. Vol. 73, pág. 370.
3. SUTCLIFFE, R. C. and FORSDYKE, A. G., 1950. The Theory and use of upper air thickness patterns in forecasting. Quart. J. Roy. Met. Soc. Vol. 76, pág. 189.
4. CHARNEY, J. G., 1949. On a physical basis for numerical prediction of large-scale motions in the atmosphere. J. Met. Vol. 6, pág. 371.
5. KNIGHTING E., CORBY, G. A., BUSHBY, F. H. and WALLINGTON, C. E., 1961. An experiment in numerical forecasting. London, Meteorological Office, Scientific Paper N.º 5.

